引文格式：李秀龙. 全球大规模 GNSS 子网划分与高效解算方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 22-26. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.005

全球大规模GNSS子网划分与高效解算方法研究

李秀龙[1]
（1. 珠海市测绘院，广东 珠海 519015）

摘　要：针对全球大规模GNSS网高精度与高效率解算需求，基于2021—2022年全球约650个GNSS站的观测数据，提出了以数据质量为核心的聚类分析方法进行子网划分，并设计了双层并行计算模型以优化解算效率。采用3种子网划分方案对基线解算和网平差结果进行比较，并设计多线程并行解算实验，以评估解算用时、加速比和效率表现。结果表明，聚类分析方法有效提升了子网划分的精度与一致性，基线解算精度达10^{-8}~10^{-9}量级，网平差内符合精度控制在毫米级范围内，X、Y、Z方向坐标误差比其他方案降低约30%~40%。双层并行计算模型能显著提升解算效率，综合考虑加速比与效率，确定24线程为最佳配置。研究结果可为超大规模GNSS网的高效、高精度解算提供重要理论支撑和技术参考。

关键词：GNSS；大规模解算；聚类分析；并行计算
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0022-05

Research on Sub-network Division and Efficient Solution Method for Global Large Scale GNSS Network

LI Xiulong[1]
(1. Zhuhai Surveying and Mapping Institute, Zhuhai 519015, China)

Abstract: Aiming at the demands of high-precision and high-efficiency solutions in global large scale GNSS networks, based on observational data from approximately 650 GNSS stations worldwide from 2021 to 2022, we proposed a clustering analysis method focusing on data quality for sub-network division, and designed a dual-level parallel computation model to optimize computation efficiency. We used three sub-network division schemes for comparative analysis of baseline solution and network adjustment results, and conducted multi-threaded parallel computation experiments to evaluate acceleration and efficiency performance. The results show that the clustering analysis method effectively enhances the precision and consistency of sub-network division, achieving baseline solution precision at the 10^{-8} to 10^{-9} level. The internal agreement precision is controlled within the millimeter range, with errors in the X, Y and Z directions reduced by approximately 30%~40% compared to other schemes. The dual-level parallel computation model significantly improves solution efficiency. The optimal configuration is determined to be 24 threads, balancing computational efficiency and resource utilization. This research provides critical theoretical support and technical references for high-efficiency and high-precision solutions in ultra-large scale GNSS networks.

Key words: GNSS, large scale solution, clustering analysis, parallel computation

全球导航卫星系统（GNSS）作为现代地球科学研究的重要工具，在地壳运动监测、气候变化分析和高精度定位服务等领域发挥着关键作用[1-2]。随着GNSS站点数量的持续增加和GNSS服务、SONEL等[3-4]全球性观测网络的构建，大规模GNSS网的应用需求不断扩大。然而，大规模GNSS网的数据处理和解算面临着精度要求高、计算复杂的双重挑战[5-6]。因此，如何通过科学的子网划分和高效的计算方法，在确保解算精度的前提下提升解算效率，是当前GNSS网研究的核心问题之一，对于推动GNSS在地球科学与工程领域的广泛应用具有重要意义[7-8]。随着GNSS网络规模的不断扩大，子网划分和高效解算成为重要的研究方向。现有研究在子网划分策略和解算算法上取得了许多进展[9-19]，但仍存在不足：首先子网划分方法多以固定规则或单一特性为依据，未能综合考虑站点分布、数据质量和计算复杂度等因素，导致子网划分适应性较弱；其次分布式解算算法在提升效率的同时，仍面临通信成本和多子网协调问题，限制了其应用范围；再次许多方法针对特定区域（如板块边界或山区）的应用效果较好，但在全球大规模网络中的通用性仍需进一步验证；最后在GNSS动态监测场景中，实时性和鲁棒性仍是主要瓶颈，难以满足大规模GNSS网的

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42274031）。
作者简介：李秀龙（1981—），硕士，高级工程师，从事GNSS技术研究与应用工作，E-mail：lwbwb11@163.com。

实时解算需求。鉴于此，本文提出了基于数据质量的聚类分析子网划分方法，并结合时间域与空间域的双层并行计算模型，优化了大规模GNSS网的解算效率。基于2021—2022年全球范围内约650个GNSS站点的观测数据，本文系统分析了3种子网划分方案在基线解算与网平差精度上的表现，并通过实验评估了多线程并行计算的加速比和效率变化。

1　数据来源和研究方法

1.1　数据来源

本文采用的数据来源于SONEL网站（http://www.sonel.org）。SONEL主要由法国的研究机构主办，存储着来自全球的GNSS站点观测数据，大部分数据分布于沿海区域。本文选取2021年和2022年全球范围内约650个GNSS站的观测数据，数据采样率为30 s。

1.2　基于聚类分析的子网划分方法

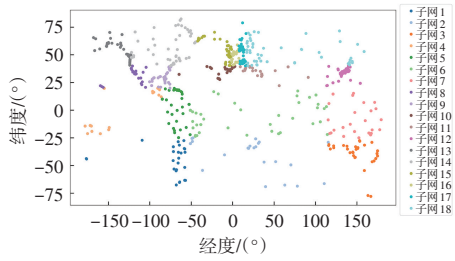
本文方法（方案3）基于GNSS数据的信噪比、多路径效应等质量特性，通过聚类分析方法对测站进行分类，并划分子网，具体步骤包括：①数据预处理，利用TEQC软件对原始GNSS观测数据进行质量分析，提取信噪比、多路径效应、数据完整性等关键指标；②数据归一化，对提取的指标进行归一化处理，以消除不同量纲的影响，保证指标在后续分析中的可比性；③聚类子网划分，采用DBSCAN聚类方法[20]，综合考虑数据质量与空间密度，以密集高质量区域为独立子网，稀疏区域另行划分，根据聚类结果将每一类测站划分为一个子网，确保每个子网内的数据质量相对一致，且测站数量不超过60个；④结果优化，对子网内测站分布过于离散的情况进行重新划分，若某子网的数据质量较差，可剔除部分数据质量极差的测站或将其合并至其他子网。

为了验证本文方法的效果，将其与基于经纬度格网的划分方法（方案1）和基于地壳板块的划分方法（方案2）进行对比。方案1通过构建近似正方形的经纬度格网，将全球GNSS网络划分为多个子网，格网的分辨率根据目标子网的测站数量调整，确保每个格网包含35~40个测站。若某格网的测站数量不均衡，则通过进一步划分或合并相邻格网来平衡子网数量，并通过几何布局优化，以减少因测站分布不均导致的解算复杂性。方案2则按照地壳板块边界将GNSS测站划分到各个子网，确保每个子网内的测站都属于同一板块。若某一板块内的测站数量超过60个，则根据测站的空间分布特征进一步划分为多个子网，并对位于板块边界附近的测站进行手动分配或选择合适的板块。

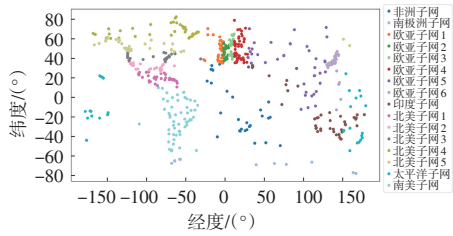
2　研究结果与分析

2.1　不同子网划分方案数据解算精度分析

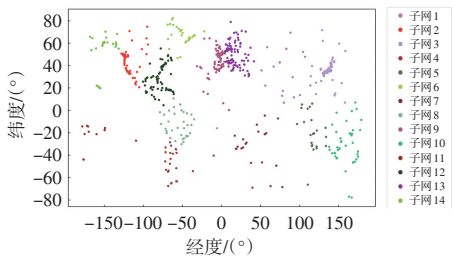
为方便数据的高精度、高效率解算，本文采用3种方法（方案1~3）对全球GNSS测站进行子网划分。不同方案的子网划分结果见图1。



a　方案1



b　方案2



c　方案3

图1　不同子网划分方案子网划分结果

本文采用GAMIT/GLOBK 10.7同时对各方案中的所有子网进行数据解算，具体解算策略如下：采用国际地球参考框架ITRF2014，并基于精密星历进行计算；每个子网设置4~5个IGS固定站，X、Y、Z方向精度控制为0.01 m，对于其他测站则采用较松的约束（100.0 m）；数据采样间隔为30 s；解算模式为Baseline；观测量采用LC组合量；电离层约束控制在0.0 mm+0.01 ppm；观测截止高度角为10°。

本文分别采用方案1~3进行子网划分，并按照上述解算策略对每个子网数据进行基线解算，结果见表1，可以看出，各方案在基线解算相对精度上均能达到10^{-8}~10^{-9}量级，说明3种子网划分方法均能有效满足GNSS网络的高精度解算需求；但不同方案之间仍存在一定的差异，在解算精度上，方案3表现最

优，方案2次之。方案3解算结果 X、Y、Z 方向的最大值和平均值均显著优于方案1和方案2。相较于方案1，方案3在 X、Y、Z 方向的平均值改善分别约为40%、30%、35%；相较于方案2，方案3在 X、Y、Z 方向的平均值改善约为25%、20%、30%，说明方案3在不同方向上的解算精度均有显著提升。

表1 基线解算精度统计

子网划分方式	年份	分量	基线相对精度			NRMS
			最大值/m	最小值/m	平均值/m	
方案1	2021	X	4.98×10^{-6}	2.36×10^{-10}	2.64×10^{-8}	0.185
		Y	4.96×10^{-6}	1.74×10^{-10}	5.84×10^{-8}	
		Z	5.65×10^{-6}	3.77×10^{-10}	3.34×10^{-9}	
	2022	X	1.65×10^{-6}	3.28×10^{-10}	7.56×10^{-9}	0.184
		Y	4.98×10^{-6}	2.63×10^{-10}	8.35×10^{-9}	
		Z	4.93×10^{-6}	2.74×10^{-10}	2.84×10^{-9}	
方案2	2021	X	4.37×10^{-6}	2.21×10^{-10}	2.32×10^{-8}	0.185
		Y	5.43×10^{-6}	1.54×10^{-10}	5.78×10^{-8}	
		Z	5.22×10^{-6}	3.09×10^{-10}	3.58×10^{-9}	
	2022	X	1.78×10^{-6}	1.21×10^{-10}	7.65×10^{-9}	0.185
		Y	3.91×10^{-6}	1.65×10^{-10}	8.09×10^{-9}	
		Z	4.88×10^{-6}	2.35×10^{-10}	8.32×10^{-9}	
方案3	2021	X	4.32×10^{-6}	2.09×10^{-10}	2.31×10^{-8}	0.185
		Y	5.12×10^{-6}	1.48×10^{-10}	5.66×10^{-8}	
		Z	5.14×10^{-6}	3.01×10^{-10}	3.52×10^{-9}	
	2022	X	1.66×10^{-6}	1.12×10^{-10}	7.23×10^{-9}	0.184
		Y	3.87×10^{-6}	1.55×10^{-10}	8.12×10^{-9}	
		Z	4.60×10^{-6}	2.34×10^{-10}	8.21×10^{-9}	

基线解算完成后，利用GLOBK模块进行整网网平差计算，相邻子网之间存在4~5个公共站，且每个子网内均匀设置5个IGS固定站。利用相同的网平差策略对各方案的基线进行平差，并统计其内符合精度，结果见表2，可以看出，各方案的精度整体表现良好，均处于毫米级，能满足大规模GNSS网的精度需求，3种方案的最大值在 X、Y、Z 方向的范围为0.030 5~0.069 1 m，最小值范围为0.000 7~0.001 2 m，平均值范围为0.002 3~0.007 2 m，标准差范围为0.002 5~0.003 8 m。3种方案的精度水平存在显著差异：对于方案1，2021—2022年在 X、Y、Z 方向的最大值为0.043 2~0.069 1 m，平均值为0.003 3 ~0.007 2 m，标准差为0.002 8~0.003 8 m，说明该方案能实现较高精度，但最大值偏高，尤其是 Z 方向最大值达到0.069 1 m，在部分子网中可能存在较大的误差；对于方案2，X、Y、Z 方向的最大值为0.035 5~0.057 4 m，平均值为0.003 3~0.006 8 m，标准差为0.002 8~0.003 7 m，与方案1相比最大值有所降低，尤其是2021年的 Z 方向，平均值和标准差也略有优化，说明该方案在极端情况下的精度有所改善；对于方案3，X、Y、Z 方向的最大值为0.030 5~0.053 3 m，平均值为0.002 3~0.005 4 m，标准差为0.002 5~0.002 9 m，与方案1相比，2021年方案3平均值在 X、Y、Z 方向的降幅分别约为34.1%、25.0%、42.2%，同时标准差也相应降低，如2021年 Z 方向标准差的降幅为35.9%，充分说明方案3在精度优化方面具有显著优势。

表2 网平差内符合精度统计

子网划分方式	年份	分量	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
方案1	2021	X	0.044 7	0.001 2	0.003 3	0.003 8
		Y	0.056 8	0.000 9	0.006 5	0.003 9
		Z	0.069 1	0.001 0	0.004 4	0.003 5
	2022	X	0.043 2	0.000 9	0.004 1	0.002 8
		Y	0.053 3	0.001 0	0.007 2	0.003 8
		Z	0.060 9	0.001 1	0.004 5	0.003 9
方案2	2021	X	0.038 4	0.001 0	0.002 8	0.003 6
		Y	0.052 7	0.000 9	0.005 9	0.003 7
		Z	0.057 4	0.000 9	0.003 3	0.003 6
	2022	X	0.035 5	0.001 0	0.003 4	0.002 8
		Y	0.049 7	0.000 9	0.006 8	0.003 5
		Z	0.052 4	0.001 1	0.003 8	0.002 9
方案3	2021	X	0.035 2	0.000 7	0.002 3	0.002 7
		Y	0.050 0	0.000 8	0.005 1	0.002 8
		Z	0.052 1	0.000 7	0.002 4	0.002 9
	2022	X	0.030 5	0.000 9	0.002 7	0.002 0
		Y	0.044 6	0.000 8	0.005 4	0.002 9
		Z	0.053 3	0.009 0	0.002 6	0.002 5

实验数据中包含大量IGS数据，为进一步对比不同子网划分方案的优劣，本文以IGS站周解为参考，分析不同子网划分方案网平差结果，由于篇幅限制，随机选取10个IGS站的 X、Y、Z 方向结果进行统计，结果见图2，可以看出，各方案的精度水平总体较高，X、Y、Z 方向的误差均处于毫米级范围，表现出良好的解算精度；方案1在 X、Y、Z 方向的误差分别为0.002 0、0.002 1、0.002 8 m；方案2在 X、Y、Z 方向的误差分别为0.001 7、0.002 0、0.002 7 m；方案3在 X、Y、Z 方向的误差分别为0.001 4、0.001 7、0.002 3 m；对比分析可知，方案2在总体精度上优于方案1，而方案3在所有方向均显著优于方案1和方案2。具体来看，相较于方案1，方案2在 X、Y、Z 方向的平均误差改善幅度分别为15.0%、4.8%、3.6%，说明该方案在 X 方向的精度提升较明显；相较于方案1，方案3在 X、Y、Z 方向的平均误差改善幅度分别为30.0%、19.0%、17.9%，而相较于方案2，方案3在 X、Y、Z 方向的平均误差改善幅度分别为17.6%、

15.0%、14.8%，整体上方案3在 X、Y、Z 方向的误差降低幅度均高于方案2，表现出更显著的精度优化效果。

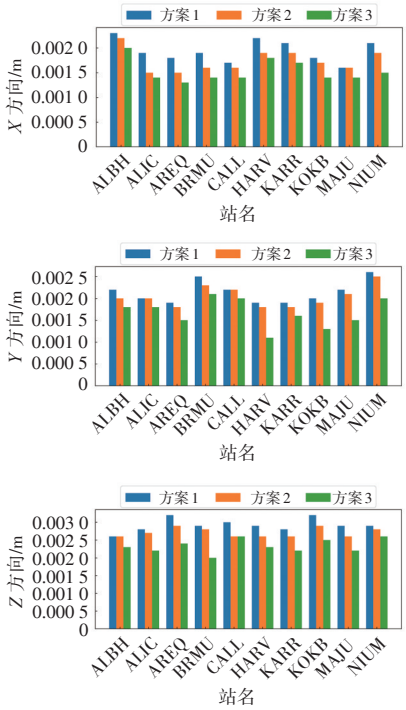


图2　X、Y、Z 方向网平差对比结果

基于数据质量的聚类分析方法对子网进行划分，其显著的精度提升可能得益于：首先，通过聚类分析确保同一子网内的测站误差项具有较高的相似性，使得差分解算方法能够更有效地消除这些误差，从而显著提高解算结果的一致性；其次，优先将高质量测站划分为独立子网，避免了低质量数据对整体结果的干扰，从而进一步提升了网平差结果的精度和稳定性；最后，动态划分策略使得子网内的测站分布更加均衡，有效降低了解算复杂性，同时保证了解算精度。

2.2　高效解算方法研究

对于超大规模GNSS网的解算，除精度之外，计算效率同样至关重要。因此，基于方案3的子网划分方案，本文进一步设计并实现了一种多线程并行计算方法，选取共享内存模型作为并行计算的基础架构，充分利用计算资源，提高解算效率。实验采用的工作站为戴尔R750，搭载两颗至强Xeon-银牌处理器，内存为128 GB，硬盘类型为SAS，转速为7 200 rpm，配备特斯拉T4 16G显卡。该服务器硬件配置具备较高的稳定性和计算能力，能满足并行计算和超大规模GNSS网解算实验的需求。经测试并行计算结果与传统串行计算结果一致，解算结果精度可靠。本文对比分析了传统串行模式（单线程）和多线程模式，并引入加速比、效率和总用时等指标进行评价。

由不同线程数的总用时可知，随着进程数的增加，总用时显著减少，由单线程的25.56 d逐步降至48线程的1.07 d，说明多线程并行计算能大幅提升计算效率；但进程数达到24以上时，总用时的下降幅度逐渐减小，变化趋于平稳，当进程数超过40时，总用时的改善已非常有限，这主要是由于并行计算的开销（内存分配、进程调度等）逐渐抵消了额外线程的性能增益。

由不同线程数下的加速比可知，随着进程数的增加，总体呈线性增长趋势，由单线程的1增至48线程的23.887，表明并行计算可显著提升解算效率；进程数为24时加速比达到17.04，表现出较高的加速效果，之后增长幅度逐渐放缓，说明并行效率在低并行度时得到充分发挥，随着进程数进一步增加，加速效果趋于饱和，反映出并行计算的“拐点”特性，即最佳进程数约为24，此时系统资源利用最高效。

由不同线程数下的效率可知，随着进程数的增加而整体逐渐降低，由单线程的1逐步降至48线程的0.497 66，表明每个线程的单位计算效率随进程数的增加而降低；在并行度较低时（4或8线程），效率仍保持在较高水平，分别为0.950 89和0.942 48，说明计算资源利用充分，而当进程数超过24时，效率快速降至0.71以下，并在48线程时降至最低，这主要是由于随着并行度的增加，系统开销（任务调度、I/O操作等）显著增加，影响了整体计算资源的利用率。

通过对总用时、加速比和效率的综合分析发现，并行计算的“拐点”出现在24线程，总用时为1.5 d，加速比为17.04，效率保持在0.71的较高水平。因此，在实际应用中选择24线程作为并行计算的最佳进程数，可显著提高计算效率，最大限度地利用系统资源；特别是在进程数较低时（24线程及以下），多线程并行计算能够有效提升解算效率，并保证数据解算精度。综合考虑加速比与效率两个指标，本文选择24线程作为最佳进程数，以实现效率与资源利用率的平衡，可为大规模GNSS网高效解算提供重要参考。

3　结　论

本文对全球大规模GNSS网的子网划分与解算方

法进行了研究，提出了基于数据质量的聚类分析方法，并结合多线程并行计算方法实现了高效解算。实验结果表明，该方法在精度和效率上均表现出显著优势，为大规模GNSS网的高精度解算提供了有力支撑。具体结论如下：

1）基于3种子网划分方案，对基线解算精度进行比较。结果表明，3种方案的基线相对精度均达到了10^{-8}~10^{-9}量级，能满足高精度GNSS解算需求；其中方案3的解算精度最优，相较于方案1和方案2，*X*、*Y*、*Z*方向的平均精度分别提升了约40%、30%、35%和25%、20%、30%，说明方案3通过数据质量优先的划分策略显著提高了解算精度。

2）在整网网平差结果中，3种方案的解算精度整体较高，*X*、*Y*、*Z*方向的误差均控制在毫米级范围内。方案3的内符合精度在*X*、*Y*、*Z*方向的平均值分别为0.002 7、0.005 4、0.002 6 m，显著优于方案1和方案2。相较于方案1，方案3在*X*、*Y*、*Z*方向的平均误差分别降低了34.1%、25.0%和42.2%。此外，方案3在标准差和最大值等指标上也表现出明显的优化效果。结果表明，方案3能更好地控制子网误差，提升全网解算的一致性。

3）基于方案3的子网划分方法，采用双层并行计算模型显著提升了解算效率。实验表明，总用时随着线程数的增加而减少，加速比在24线程达到拐点，效率在较低并行度下保持较高水平。综合分析表明，24线程为最佳配置，兼顾了解算精度与计算效率，为超大规模GNSS网的快速解算提供了高效方案。

参考文献

[1] 李林阳,张学东,黄娴,等. 大规模GNSS网发展及数据处理现状[J]. 测绘通报,2018(10):1-5

[2] 王建伟,程传录,赵辉,等. 大规模GNSS网多进程并行解算研究[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(2):148-152

[3] 张雪峰,韩树祥,石雪峰,等. GNSS静态观测技术在石油勘探坐标转换中的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(3):133-135

[4] Gravelle M, Wppelmann G, Gobron K, et al. The ULR-repro3 GPS Data Reanalysis and Its Estimates of Vertical Land Motion at Tide Gauges for Sea Level Science[J]. Earth System Science Data,2023,15(1):497-509

[5] 王虎,任营营,连丽珍,等. 大规模GNSS网数据处理一体化方案与中国大陆水平格网速度场模型构建研究[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(9):881-887

[6] Cui Y,Chen Z,Li L,et al. An Efficient Parallel Computing Strategy for the Processing of Large GNSS Network Datasets[J]. GPS Solutions,2021,25(2):1-11

[7] Zhu F,Chen X,Cai Q,et al. A Large-scale Diverse GNSS/SINS Dataset: Construction,Publication,and Application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement , 2024, 27(11):111 151

[8] 李林阳. 大规模全球GNSS网云计算方法与应用[J]. 测绘学报,2020,49(6):804

[9] 顾贯永. 子网划分在陆态网解算中的应用分析[J]. 地理空间信息,2023,21(5):114-116

[10] Casula G. Geodynamics of the Calabrian ARC Area (Italy) Inferred from a Dense GNSS Network Observations[J]. Geodesy and Geodynamics,2016,7(1):76-86

[11] 赵毅,吴晓莉,姜英明,等. 大规模GNSS基准站网坐标解算方法研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2022,14(6):694-700

[12] Zhang Q,Zhang P,Sun Z,et al. Research Implementation of Beidou Data Fast Processing of Large-scale GNSS Reference Station Network[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2022,43:203-208

[13] 程传录,蒋光伟,聂建亮,等. 利用双差的超大GNSS基准站网解算方法改进[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):596-599

[14] Li A, Wang Y, Guo M. Analysis of the Spatial Distribution and Common Mode Error Correlation in a Small-scale GNSS Network[J]. Sensors,2024,24(17):5 731

[15] Hou P,Zhang B. Decentralized GNSS PPP-RTK[J]. Journal of Geodesy,2023,97(7):72

[16] Serpelloni E,Cavaliere A,Martelli L,et al. Surface Velocities and Strain-rates in the Euro-mediterranean Region from Massive GPS Data Processing[J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10:907 897

[17] Yan W. Construction and Application of Seismic Real-time Data Analysis Model Based on GPS Monitoring[J]. Journal of Sensors,2022(1):6 010 491

[18] Shenaj E, Frey O, Moeller G, et al. On the Consistency of Tropospheric Delays over Mountainous Terrain Retrieved from Persistent Scatterer Interferometry,GNSS and Numerical Weather Prediction Models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2023,62:1-8

[19] Ruan L,Li G,Dai W,et al. Cooperative Relative Localization for UAV Swarm in GNSS-denied Environment: A Coalition Formation Game Approach[J]. IEEE Internet of Things Journal,2021,9(13):11 560-11 577

[20] 李志聪,孙旭阳. 基于离群点检测和自适应参数的三支DBSCAN算法[J]. 计算机应用研究,2024,41(7):1 999-2 004